

水平噴流によって形成される砂段について

山口大学 齋藤 隆

1. まえがき

先年、水平噴流による洗碛について、洗碛の進行に伴ない洗碛井構が1期、2期、3期と変化していくこと、および、3期洗碛についての洗碛井構についてのモデルを發表した。従来、この種の洗碛において、洗碛穴内の砂移動形式の急激な変化は考えられていなかった。著者等の發表した3期洗碛において、洗碛穴内に砂段が形成され、この砂段まで主に掃流形式で移動してきた砂粒が多数に浮遊状態となり、浮遊形式で洗碛穴外に出ていく砂量によって洗碛が進行する。したがって、洗碛穴内に形成される砂段の形状、規模は洗碛の進行に大きな影響を与える。

本報告は水中安息角で盛り上げた砂の斜面に水平噴流を衝突させ、砂の斜面に形成される砂段について、特に砂段頂部の噴き上げ角 θ_f について検討を試みたものである。

2. 実験装置および実験方法

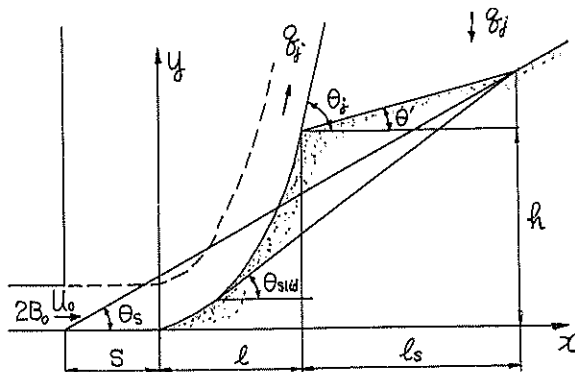
実験に用いた水槽は巾17.5cm、長さ200cm、深さ100cmの両側面および底面を有機ガラス張りとしたものである。水槽の上流端より70cmの直前に流速分布が一様になるように縮流防止板を設けたオリフィス型式の噴流発生装置を設けた。噴出流速は噴流発生装置上流の水位を調節することによって変化した。噴出口巾は1.0cm、2.0cmとした。実験に使用した砂は左表の特性をもつほぼ均一な砂3種を用いた。

50% 粒径 (cm)	限界摩擦速度 u_{*c} (cm/sec)	沈降速度 W (cm/sec)	安息角 θ_s
0.141	2.92	12.3	32°30'
0.077	2.06	8.33	32°30'
0.027	1.58	3.59	32°30'

実験は、まず実験水槽に水を満し、上の砂を解かして沈降させて噴出口前面から安息角 θ_s の砂堆を形成する。これを初期形状として測定する。このようにして形成した斜面に目的の噴出速度をもつ噴流を衝突させると、斜面に衝突した流れは噴き上げ流れとなり、下図のとき砂段を形成する。

実験開始後、砂段の頂部の位置は徐々に下流に移動していくが30～60分を全通するとほとんど移動は認められなくなり、砂段の形状、規模は一定のものになる。

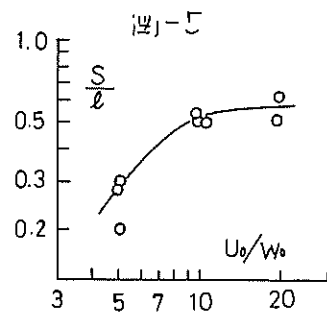
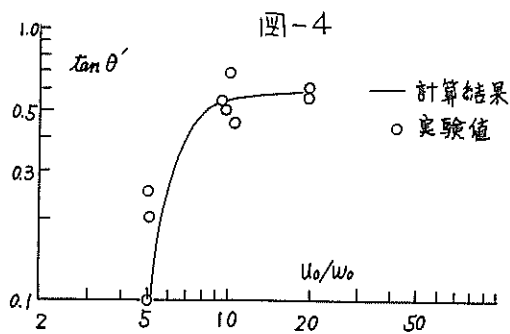
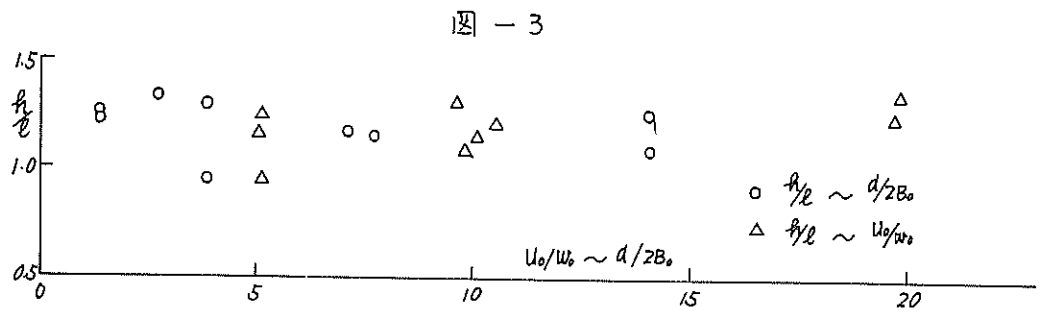
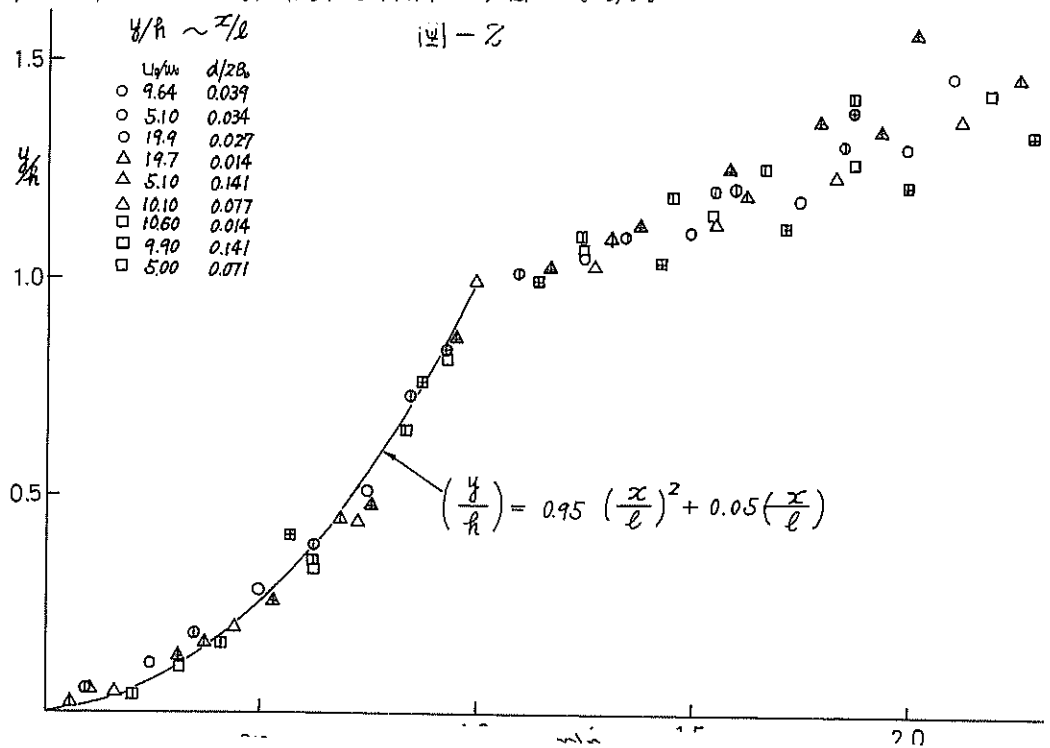
図-1



3. 実験結果

実験開始後1時間後における砂段の形状を測定、流路向の水平および鉛直距離を基準長として示すと図-2となる。また、 h と l の比を $d/2B_0$ 、

U_0/W_0 に対して図示したのは図-3である。法肩背後の斜面勾配 θ' は、噴出口より流路までの距離 S/ℓ を U_0/W_0 に対して図示したものは図-4、図-5である。



4 砂段の安定に関する考察

上述の砂段法面のほとんどの部分は水中安息角よりかなり急な斜面であることより、噴流から受ける力と砂段の不安定力との間に力の平衡関係が存在することと考えられる。すなわち、砂段法面に常に砂移動が行われているにもかかわらず砂段が一定の位置、形状、規模を保持していることは砂段に関して一種の砂移動における砂量の平衡関係が考えられる。この力平衡が砂量に関する平衡関係に次の様に考える。

流れの状態としては、法肩までの流動距離は噴流中の5~10倍程度で、かつ、流れの曲りに対する流れの集中などを考慮して図-1に示す様に噴出流速 U_0 なる一様な流れとする。砂段の不安定部分は初期砂面と砂段法肩背後の斜面との交点から砂段法面へ掘り込線よりどの部分とすると、掘り面の維持係数 M として力の関係は次式で与えられる。

$$\rho g V_{sed} (\sin \theta_{sed} - M \cos \theta_{sed}) = 2B_s U_0' \{1 - \cos(\theta_j' - \theta_{sed})\} \quad (1)$$

ここで $S = \rho_s / \rho$, ρ_s : 砂の密度, ρ : 水の密度。

法肩から U_0 なる流速で θ_j なる角度で吹き上げられる砂量 Q_j が法肩背後の斜面に落下し、斜面へと転落してきて砂段を形成する。砂段の不安定係数 V_{sed} は次のように次の関係が考えられる。

$$V_{sed} \propto (Q_j / U_0)^2 \quad (2)$$

式中の Q_j は法肩から吹き上げられる砂量であり、 Q_j と U_0 は $Kalinski-Brown$ 型の砂量式を用い、 $U_0 = U_0' / \varphi$ と置くと Q_j は次式のようになる。

$$\frac{Q_j}{\sqrt{\rho g d^3}} = K \frac{1}{\varphi^{2n}} \left(\frac{U_0^2}{\rho g d} \right)^{2n} \left(\frac{U_0}{U_0'} \right)^{2m} \left\{ 1 - \varphi^2 \left(\frac{U_{xc}^2}{U_0^2} \right) \left(\frac{U_0}{U_0'} \right)^{-2} \right\} \left(\frac{1}{\sin \theta_j' + M \cos \theta_j'} \right)^m \quad (3)$$

$$U_{xc}^2 = U_{xc0}^2 (\sin \theta_j' + M \cos \theta_j')$$

(1) 式(2), (3) 式を用いて書き直すと、

$$\frac{1 - \cos(\theta_j' - \theta_{sed})}{\sin \theta_{sed} - M \cos \theta_{sed}} = A \left(\frac{U_0}{U_0'} \right)^{4n-2} \left\{ 1 - B \left(\frac{U_0}{U_0'} \right)^{-2} \right\}^2 \frac{d}{2B_0} \quad (4)$$

$$A \propto K^2 \frac{1}{\varphi^{4n}} \left(\frac{U_0^2}{\rho g d} \right)^{4n-4} \left(\frac{1}{\sin \theta_j' + M \cos \theta_j'} \right)^{2n}$$

$$B = \varphi^2 \left(\frac{U_{xc}}{U_0} \right)^2$$

5 実験結果との比較

砂段法面形状を図-2に示す曲線、すなわち、

$$(y/l) = 0.95(x/l)^2 + 0.05(x/l)$$

と表わすと、沈積量と堆積量とが等しいことより

$$\frac{1}{2} \left(1 - \frac{S}{\ell} - \frac{\ell}{2} \right)^2 \tan \theta_s = 0.942 \frac{B}{\ell} + \frac{B}{2} \frac{\ell}{\ell} + \frac{1}{2} \left(\frac{\ell}{\ell} \right)^2 \tan \theta'$$

また、幾何学的関係より

$$(1 - \frac{S}{L} + \frac{L_0}{L}) \tan \theta_s = \frac{R}{L} + \frac{L_0}{L} \tan \theta'$$

実験結果として $L/L_0 = 1.19$ かつ S/L の値として図-5の曲線を利用すると、 L_0 、 $\tan \theta$ の値が求められる。この結果より θ_{crit} が決定出来る。

(4) 式中の指数 M は流砂公式中の指数である。流砂公式としてほぼ Einstein の流砂公式の値と等しくなるようにすると $M = 3/2$ 、また $K = 2.6$ となる。

滑り面の摩擦係数 μ の値としては、砂底の砂段にはおおよそ力の滑り面に垂直な方向の成分が存在することとを考慮して $\tan \theta_{crit}$ に近く近い値があることより $\mu = \tan 36.11^\circ$ を用いる。

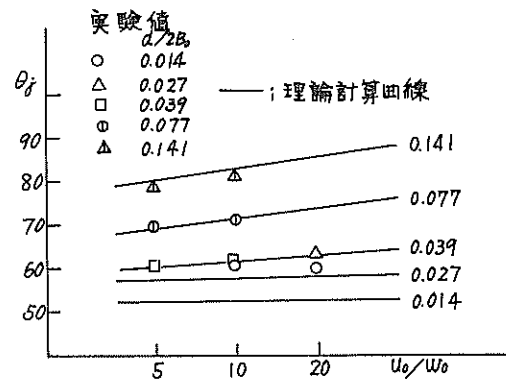
φ を φ' 程度のものとするといふのは実験砂の平均値として 3.0 なる値となる。 $\sin \varphi' + \mu' \cos \varphi'$ とほぼ等しい値であるものとするとき $A = 0.05$ となる。これらの値を用いると $(\tan \theta) / (g/w_0)^{1/2} \approx 1/10$ となり、砂粒が斜面を転落する平均速度はほぼ沈降速度の $1/3$ 程度となる。

$A = 0.05$ 、 $B = 3.0$ として(4)式より求める θ_j と測定値と比較したのが図-6にある。

図-6の θ_j の計算結果と測定結果は粒径の小きい場合に際くとも非常によく一致している。

粒径の小きい場合の計算値と測定値の差は、砂段法面における砂粒の移動型はほとんど掃流状態にあるものとして $M = 3/2$ と用いたのがあつた、粒径の小きい場合にはかなり浮遊型式の θ_j が含まれてくることによると考えられる。

図-6



6 おまけ

以上、砂段における砂循環の条件、おおよそ力の平均条件より求められ噴き上げ角 θ_j の計算値と測定値の一致は、噴流流れによつて形成される砂段の形成機構と述べるモデルはほぼ妥当なものであらうことと示して置くと考えられる。